



ارائه مدل حرارتی کوره الکتریکی خلاء مکعبی برای محاسبات بلادرنگ: مدل معادلات دیفرانسیل معمولی غیر خطی و اعتبارسنجی تجربی

داریوش آجرو^۱، مصطفی نظری^{۲*}، محسن نظری^۳، ناصرالدین سپهری^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ استادیار، دانشکده مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۳ دانشیار، دانشکده مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۱

چکیده

مدل ریاضی در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های انتقال حرارت نقش بسزایی دارد. به دلیل وجود مود انتقال حرارت تشعشع در محیط خلاء، رفتار چنین سیستم‌هایی بسیار غیرخطی است. در این مقاله، یک مدل معادلات دیفرانسیل معمولی غیرخطی جدید برای یک محفظه حرارتی مکعبی خلاء جهت استفاده در محاسبات بلادرنگ، استخراج شده است و اعتبار مدل با استفاده از یک مجموعه تجربی، مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، یک ورودی مشخص به مدل ریاضی و مجموعه تجربی داده شده که با بخشی از این اطلاعات، پارامترهای سیستم با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک استخراج شده است. سپس، رفتار مدل ریاضی و سیستم تجربی با پارامترهای استخراج شده، در سیکل‌هایی مقایسه شده است که در بهینه‌سازی از آن‌ها استفاده نشده است. مقایسه‌های انجام شده، صحت مدل ریاضی ارائه شده را نشان می‌دهد. سپس، برای بررسی دقیق‌تر مدل و مشاهده میزان تاثیر پارامترهای مدل بر رفتار سیستم، از روش مونت‌کارلو برای آنالیز حساسیت کلی مدل استفاده شده است. برای این منظور از نمونه برداری لاتین‌هایپرکیوب و ضرایب همبستگی رتبه جزئی برای رتبه‌بندی پارامترها استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب رسانش حرارتی عایق‌ها، مهم‌ترین پارامتر تاثیرگذار بر رفتار سیستم است.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی حرارتی؛ انتقال حرارت تشعشعی؛ اجاق خلاء؛ شبیه‌سازی مونت کارلو؛ الگوریتم ژنتیک.

Mathematical Model of a Vacuum Box Electric Furnace for Online Computation: A Nonlinear Ordinary Differential Equation Model and Experimental Verification

D. Ajorloo¹, M. Nazari^{2*}, M. Nazari³, N. Sepehry²

¹ MSc Student, Mech. Eng, Shahrood Univ of Tech, Shahrood, Iran.

² Assis. Prof, Mech. Eng, Shahrood Univ of Tech, Shahrood, Iran.

³ Assoc. Prof, Mech. Eng, Shahrood Univ of Tech, Shahrood, Iran.

Abstract

Mathematical modeling plays an important role in designing and optimizing of heat transfer systems. Due to radiation heat transfer mode in a vacuum environment, the behavior of the system is very nonlinear. In this paper, a new nonlinear ODE model for a vacuum box heat chamber is developed which is suitable for online computation, and the validity of the model is investigated using an experimental set. A specific input is given to the both mathematical model and the experimental set. With some of this data, system parameters are extracted using the genetic algorithm. Then, the behavior of the mathematical model and the experimental system with the extracted parameters are compared using cycles that have not been used in optimization. The comparison shows the accuracy of the proposed mathematical model. Then, to examine the model more closely and to observe the effect of model parameters on system behavior, the Monte Carlo method was used to analyze the overall sensitivity of the model. For this purpose, Latin hypercube sampling and partial rank correlation coefficients have been used to rank the parameters. The results show that the thermal conductivity of insulators is the most important parameter affecting the behavior of the system.

Keywords: Thermal Modeling; Radiation Heat Transfer; Vacuum Oven; Monte Carlo Simulation; Genetic Algorithm.

۱- مقدمه

کوره‌های تحت خلاء کاربردهای وسیعی در صنعت و تحقیقات آزمایشگاهی دارند که رایج‌ترین نوع آن‌ها دارای هندسه مکعبی است. در بسیاری از صنایع مانند صنایع متالوژی، برای انجام عملیات حرارتی (باز پخت، سخت‌کاری پوسته، پیر سخت‌کاری، برگشت دادن، کربن‌دهی، نرمال‌سازی و کوئنچ کردن) روی یک قطعه، جهت بهبود خواص فیزیکی آن از اجاق و یا کوره تحت خلاء استفاده می‌شود [۱]. خشک کردن مواد غذایی، قطعات الکترونیکی و تجهیزات پزشکی که در فرآیند خشک کردن از طریق انتقال حرارت به روش جابه‌جایی ممکن است آسیب ببینند، از جمله کاربردهای این سیستم‌ها است. مدل‌سازی ریاضی آن‌ها علاوه بر اینکه به درک بهتر فرآیند انتقال حرارت در چنین سیستم‌هایی کمک می‌کند، می‌تواند در طراحی کنترل کننده دما برای آن کاربردی باشد.

بسته به هدف، مدل‌های مختلفی برای سیستم‌های حرارتی ارائه شده‌اند که در مقدمه آورده شده است. بهینه‌سازی مصرف انرژی، طراحی کنترل‌کننده مناسب دما و یا دستیابی به عملکرد کوره قبل از انجام آزمایش‌های عملی از اهداف مدل‌سازی چنین سیستم‌هایی است. مدل‌های سه‌بعدی و دوبعدی غالباً برای طراحی ابعادی و آنالیز حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد که حل معادلات آن‌ها زمان‌بر و البته دقیق می‌باشد. مدل‌های صفر-تک بعدی، تابع تبدیل و فضای حالت برای کاربردهای بلادرنگ مناسب می‌باشند. البته مدل‌های تابع تبدیل خطی هستند که برای محاسبات بلادرنگ مانند طراحی کنترل-کننده استفاده می‌شوند و صرفاً حول یک نقطه کار اعتبار دارند. مدل‌های فضای حالت به دلیل داشتن اطلاعات داخلی سیستم و همچنین سرعت حل بالا، هم در طراحی ابعادی و هم در محاسبات بلادرنگ کاربرد بسیاری دارند. لازم به ذکر است که طراحی کنترل‌کننده‌های پیشرفته مانند مود لغزشی، پیش‌بین مدل و ... فقط بر مبنای مدل ریاضی فضای حالت سیستم امکان‌پذیر است که تا کنون برای سیستم‌های حرارتی باکسی تحت خلاء ارائه نشده است.

در مدل‌های سه بعدی، از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) استفاده شده است. این مدل‌ها در نمایش

فرآیند انتقال حرارت داخل اجاق و کوره دارای دقت بالایی هستند، اما زمان پردازش آن‌ها زیاد می‌باشد [۲-۵]؛ بنابراین مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی نمی‌توانند برای کاربردهای بلادرنگ^۱ استفاده شوند. در [۶] روشی برای حل مسئله انتقال حرارت سه بعدی ارائه شده است که حل آن بسیار زمان بر است. با استفاده از یک مدل انتقال حرارت سه بعدی عددی، یک کنترل کننده PID برای بهینه کردن فرآیند گرم کردن و کمینه کردن مصرف انرژی برای یک کوره خلاء توسط هائو و همکاران ارائه شده است [۲]. کاسترو و همکاران یک مدل ریاضی سه بعدی برای یک کوره ذوب آهن به منظور کاهش اکسایش آهن ارائه کرده‌اند [۳]. تانگ و همکاران برای بررسی فرآیند بازگرمایش یک قطعه، یک مدل سه بعدی را مورد استفاده قرار داده‌اند [۵]. یک طراحی بهینه برای یک کوره خلاء با استفاده از داده‌های تجربی و تحلیل گرمایی توسط لی و شن ارائه شده است تا با استفاده از آن یک کوره خلاء دما بالا طراحی شود [۷]. لولو جیو و همکاران یک مدل سه بعدی برای شبیه‌سازی فرآیند ذوب آهن در یک کوره ذوب آهن، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی ارائه داده‌اند [۸] و همچنین یک مدل ریاضی سه بعدی برای یک کوره شیمیایی توسط پروکوفوو توسعه داده شده است [۹]. با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی کارالیس و همکاران یک مدل سه بعدی برای کوره قوس الکتریکی ارائه داده‌اند [۱۰]. در [۱۱] یک مدل سه‌بعدی برای بررسی پدیده انتقال حرارت و احتراق در بخش تشعشعی یک کوره ارائه شده است.

از طرفی دیگر، مدل‌های دو بعدی نسبت به مدل‌های سه بعدی حجم محاسبات کمتری دارند، اما دقت آن‌ها پایین‌تر است. مدل‌های دو بعدی انتقال حرارت برای مطالعه انتقال حرارت در یک کوره ذوب آهن توسط ریچارد و همکاران مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۲]. با استفاده از شبیه‌سازی یک لوله دمنده، مدل انتقال حرارت دو بعدی یک محفظه احتراق ذغال سنگ پودر شده توسط تاکدا و همکاران به دست آمده است [۱۳]. جنگ جی وای و همکاران [۱۴] یک مدل دو بعدی برای ارزیابی الگوی انتقال حرارت برای کاهش مصرف انرژی ارائه داده‌اند. اسکوپک و

^۱ Real-Time

است. مدل ارائه شده به دلیل سادگی، نه تنها قابلیت مناسبی برای طراحی کنترلرهای بر مبنای مدل را داراست، بلکه برای ارزیابی حرارتی و بهینه‌سازی نیز مناسب است. در حقیقت نوآوری تحقیق حاضر در ارائه مدلیست که در کنار سادگی قابلیت استفاده برای تحلیل فرآیند انتقال حرارت و طراحی کنترل کننده را داراست. تا کنون مدل‌های فضای حالت محدودی برای سیستم‌های حرارتی ارائه شده است (مانند مدل فضای حالت استفاده شده در مرجع [۱۷]).

- اعتبارسنجی مدل ارائه شده، با استفاده از یک آون باکسی الکتریکی خلاء، پارامترهای مدل برای این مجموعه با استفاده از الگوریتم ژنتیک استخراج شده است. مقایسه رفتار مدل (حل مدل فضای حالت) و نتایج تجربی، نشان‌دهنده اعتبار مدل ارائه شده است.

- برای بررسی تاثیر تغییر در هر یک از پارامترهای مدل بر رفتار سیستم، آنالیز حساسیت کلی با استفاده از روش مونت کارلو انجام شده است.

ساختار مقاله به این شکل خواهد بود که در بخش دوم، سیستم تجربی مورد استفاده و اجزاء آن شرح داده می‌شود. در بخش ۳، مدل ریاضی سیستم بر مبنای معادلات دیفرانسیل معمولی استخراج می‌شود. سپس، در بخش ۴ و ۵ پارامترهای سیستم شناسایی و نتایج مدل ریاضی با نتایج تجربی اعتبارسنجی می‌شود. در بخش ۶ با شبیه‌سازی مونت-کارلو، حساسیت مدل به پارامترهای سیستم بررسی شده است. در انتها نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲- سیستم تجربی

برای اعتبار سنجی مدل ریاضی که در ادامه ارائه خواهد شد، از یک کوره خلاء که در شکل ۱ نشان داده شده است، استفاده شده است. این کوره خلاء با حجم ۴۰ لیتر توسط شرکت دانش بنیان علم گستران صنعت آرتا ساخته شده است. فضای داخل این آون توسط پمپ خلاء و از طریق یک درگاه KF16 خلاء می‌شود و از چهار جهت با چهار المنت میله‌ای، حرارت‌دهی می‌شود. دمای داخل محفظه کوره خلاء توسط یک حس گر PT100 اندازه‌گیری می‌شود.

همکاران یک مدل دو بعدی عددی انتقال حرارت برای یک کوره بازگرمایش فولاد ارائه داده‌اند [۱۵]. مقایسه‌ای بین یک مدل دوبعدی و سه بعدی انتقال حرارت به منظور شبیه‌سازی عملکرد گرمایی کوره بازگرمایش آهن توسط تان و همکاران انجام شده است [۱۶].

مدل‌های دو بعدی و سه بعدی به دلیل زمان‌بر بودن محاسبات برای کاربردهای بلادرنگ مناسب نمی‌باشند. برای حل این مشکل، مدل‌های یک-صفر بعدی ارائه شده‌اند. یک مدل ریاضی برای یک کوره با هندسه مکعبی با استفاده از معادلات موازنه انرژی توسط تودون-مارتینز ارائه شده است [۱]. انرژی مصرفی در هر شعله در دماهای مختلف با در نظر گرفتن عملکرد کوره، خصوصیات بار و خصوصیات فیزیکی کوره محاسبه می‌شوند. میر و همکاران یک مدل یک-صفر بعدی ترمودینامیکی ارائه داده‌اند که می‌تواند در اندازه‌گیری اثر احتراق غنی شده با اکسیژن در فرآیند انتقال حرارت مورد استفاده قرار گیرد [۴]. مدل‌های به شکل فضای حالت برای یک کوره بازگرم، کوره سخت‌کاری شیشه با در نظر گرفتن تغییرات دمایی در دیواره‌های کوره و شیشه و یک کوره صنعتی مانند [۱۵، ۱۷ و ۱۸] و مدل‌های تابع تبدیل مانند [۲۱-۱۹]، به طور معمول برای طراحی کنترل کننده دما بر اساس مدل استفاده می‌شوند؛ همچنین، از روش‌های یادگیری ماشین نیز در مدل‌سازی کوره‌ها استفاده شده است [۲۲ و ۲۳].

غالب مدل‌های سه‌بعدی و دوبعدی ارائه شده برای بررسی انتقال حرارت در کوره‌ها و اجاق‌ها به صورت معادلات دیفرانسیل پاره‌ای (PDE) هستند و با روش‌های CFD حل شده‌اند، که حل و تحلیل این مدل‌ها به دلیل پیچیده بودن معادلات زمان‌بر است و از طرفی اگر معادلات ساده شوند، دقت مدل کاهش می‌یابد. مدل‌های ارائه شده به شکل تابع تبدیل به دلیل ماهیت خطی بودن فقط برای طراحی حول نقطه کار مناسب هستند.

با توجه به موارد بیان شده، نوآوری‌های مقاله و دستاوردهای آن به صورت می‌باشد:

- بخش اصلی نوآوری این مقاله ارائه مدل غیرخطی به فرم فضای حالت برای کوره باکسی الکتریکی خلاء است. این مدل به فرم معادلات دیفرانسیل معمولی است که مناسب برای محاسبات بلادرنگ

شده است. بین هر صفحه و محیط اطراف آن عایق قرار دارد. انتقال حرارت از طریق عایق‌ها به روش رسانش انجام می‌شود و انتقال حرارتی که بین عایق‌ها و محیط اطراف صورت می‌گیرد، از نوع همرفت است. برای بررسی تغییرات دمایی داخل کوره، یک نقطه کرووی شکل در مرکز آن در نظر گرفته شده است (شکل ۵ نقطه A₇) که در واقع این نقطه بیانگر محل قرارگیری حس گر PT100 است. مساحت این نقطه کرووی شکل با A₇ نشان داده شده است.

۳- مدل سازی ریاضی:

در شکل ۳ مدار الکتریکی معادل برای کوره خلاء بر اساس شکل ۲ ترسیم شده است.

فرضیات مدل سازی به صورت زیر می‌باشد:

- سیستم با پارامترهای مجزا^۲ در نظر گرفته شده است؛ بنابراین، مدل سیستم به صورت معادلات دیفرانسیل معمولی خواهد شد.
- انتقال حرارت در صفحات با توجه به کم بودن ضخامت ورق‌ها در برابر سایر ابعاد به صورت تک-بعدي در نظر گرفته شده است.
- پارامترهای وابسته به دمای سیستم مانند ضرایب انتقال حرارت و ضریب گسیل به صورت تابع خطی از دما در نظر گرفته شده‌اند.
- فرض شده است که شار حرارتی وارده از المنت‌ها به صورت یکنواخت به تمام سطح دیواره‌ها وارد می‌شود.
- سرعت پاسخ المنت‌ها و ترموکوپل در مقایسه با سرعت پاسخ سیستم، بسیار سریع در نظر گرفته شده است. بنابراین، مدل المنت‌ها و ترموکوپل در نظر گرفته نشده است.

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، هفت گره بیانگر صفحات جانبی کوره و نقطه مرکزی آن می‌باشند (J₁...J₇). در این مدار شار حرارتی معادل با جریان، و دما معادل با ولتاژ است؛ همچنین، بسته به نوع مود انتقال حرارت بین صفحات و یا بین صفحات و محیط اطراف از مقاومت معادل آن استفاده شده است [۲۴]. حال با استفاده از قوانین



شکل ۱- مجموعه تجربی کوره الکتریکی خلاء مکعبی

همانطور که از اسم این حس گر برمی‌آید، جنس آن از پلاتین است (نماد شیمیایی پلاتین PT است) و عدد ۱۰۰ بیانگر مقاومت الکتریکی آن در دمای صفر درجه سانتی‌گراد بر حسب اهم است. این حس گر در سه نوع دو سیم، سه سیم و چهار سیم است و می‌تواند تا دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد را اندازه‌گیری کند. دقت این حس گرها تا یک دهم درجه است. این حس گر با استفاده از یک اتصال خلاء، دمای داخل محفظه را اندازه‌گیری می‌کند. دیواره‌های این محفظه توسط پشم‌سنگ و عایق سرامیکی ورقه‌ای، از محیط اطراف عایق شده‌اند. با استفاده از ماژول MAX31865 داده‌هایی که توسط حس گر PT100 گرفته می‌شود، به داده‌های قابل فهم برای برد آردوینو یونو^۱ تبدیل می‌شود و به این ترتیب دما در زمان‌های مختلف خوانده می‌شود. شماتیک سیستم در شکل ۲ نشان داده شده است.

همانطور که قبلاً اشاره شد، کوره خلاء مورد بررسی دارای هندسه مکعبی است و جنس صفحات آن از فولاد ضد زنگ (AISI 304) است. مساحت صفحات کوره به ترتیب با A₁-A₆ نشان داده شده است. شار حرارتی که توسط گرمکن‌های الکتریکی تولید می‌شوند، فقط از طریق صفحات ۱ تا ۴ اعمال می‌شوند. گرمکن‌ها در پشت این صفحات قرار دارند که شار حرارتی وارده توسط آن‌ها با q₁-q₄ نشان داده

² Lumped Parameter Model

¹ Arduino Uno board

در رابطه ۲، ε_i ضریب گسیل سطح نام و در رابطه ۳، F_{ij} ضریب شکل بین سطح نام و سطح زام است [۲۴]. موازنه انرژی در هر صفحه می‌تواند با رابطه (۴) بیان شود:

$$q_i = \frac{J_i - \sigma T_i^4}{R_i} - \frac{T_i - T_\infty}{R_{cond} + R_{tconv}} = m_i C_p \frac{dT_i}{dt}, i = 1 \dots, 6 \quad (4)$$

در این رابطه q_i شار ورودی به سطح نام بر حسب وات (W)، σ ثابت استفان بولتزمن بر حسب $\frac{W}{m^2.K^2}$ ، T_i دمای سطح نام بر حسب کلونین (K)، m_i جرم صفحه نام بر حسب کیلوگرم (kg)، C_p ظرفیت گرمایی بر حسب $\frac{J}{kg.K}$ ، T_∞ دمای محیط بر حسب کلونین (K)، R_{cond} مقاومت گرمایی رسانش بر حسب $\frac{W}{m.K}$ و R_{tconv} مقاومت گرمایی همرفت بر حسب $\frac{W}{m^2.K}$ است. مقدار C_p برابر با $550 \frac{J}{kg.K}$ ، جرم صفحات ۱ تا ۶ برابر با 0.1422 کیلوگرم و جرم نقطه ۷ برابر 0.827 کیلوگرم است. برای نقطه کروی، موازنه انرژی را می‌توان به صورت زیر نوشت [۲۴].

$$\frac{J_7 - \sigma T_7^4}{R_7} = m_7 C_p \frac{dT_7}{dt} \quad (5)$$

مقاومت‌های همرفت R_{tconv} و رسانش R_{cond} از رابطه زیر به دست می‌آیند [۲۴]:

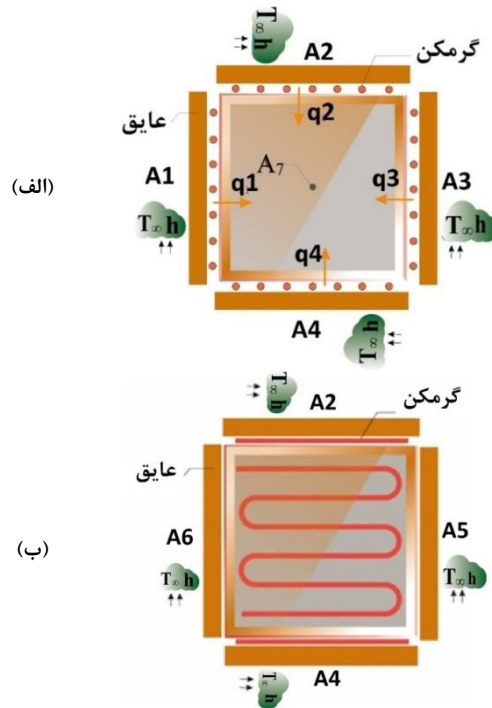
$$R_{t,conv} = \frac{1}{hA_i}, i = 1..6 \quad (6)$$

$$R_{cond} = \frac{\Delta x}{kA_i}, i = 1..6 \quad (7)$$

که در آن h ضریب انتقال حرارت همرفت، Δx ضخامت عایق و k ضریب انتقال حرارت رسانش است. با تقسیم طرفین تساوی روابط ۴ و ۵ بر $m_i C_p$ داریم:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{q_i}{m_i C_p} - \frac{J_i - \sigma T_i^4}{R_i m_i C_p} - \frac{T_i - T_\infty}{m_i C_p (R_{cond} + R_{tconv})}, i = 1 \dots, 6 \quad (8)$$

$$\frac{dT_7}{dt} = \frac{J_7 - \sigma T_7^4}{R_7 m_7 C_p} \quad (9)$$



شکل ۲- طرح شماتیک یک کوره تحت خلاء؛ (الف) نمای روبرو (ب) نمای جانبی.

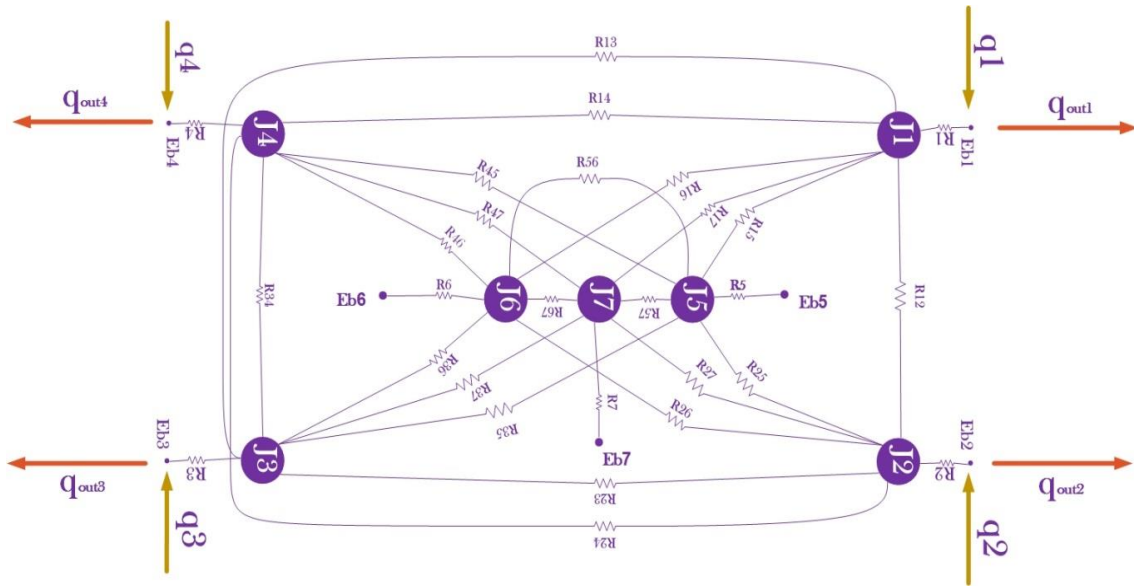
مربوط به مدارهای الکتریکی می‌توان روابط را استخراج نمود. از آن جایی که جریان ورودی به هر گره، با جریان خروجی از آن گره باید برابر باشد، می‌توان رابطه (۱) را برای هر گره نوشت [۲۴]:

$$\frac{E_{bi} - J_i}{R_i} = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{R_{ij}}, i, j = 1 \dots 7, N = 7. \quad (1)$$

در این رابطه E_{bi} توان گسیل جسم سیاه سطح نام، J_i شار تشعشع خروجی از سطح نام و J_j شار تشعشع ورودی به سطح نام است. R_i مقاومت گرمایی سطح نام و R_{ij} مقاومت بین سطح نام و سطح زام است. مقاومت‌ها از روابط (۲-۳) به دست می‌آیند [۲۴]:

$$R_i = \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i A_i}, i = 1 \dots 7 \quad (2)$$

$$R_{ij} = (A_i F_{ij})^{-1}, i, j = 1 \dots 7 \quad (3)$$



شکل ۳- مدار الکتریکی معادل برای سیستم حرارتی کوره خلاء

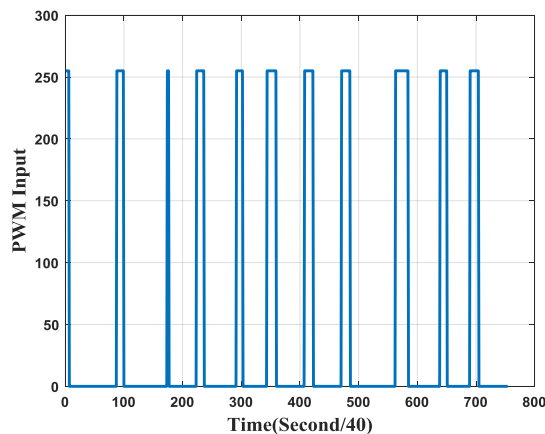
معادلات ارائه شده در رابطه بالا به فرم فضای حالت هستند که در آن ورودی q_i و خروجی آن دمای T_7 است. این معادلات با استفاده از محیط سیمولینک نرم افزار متلب و با روش ODE45 حل شده است. دستور ODE45 در نرم افزار متلب از الگوریتم ضمنی Runge-Kutta (4,5) استفاده می کند. در این الگوریتم می توان با تنظیم پارامترهای RelTol و AbsTol، تolerانس خطا را جهت همگرایی تنظیم کند. در این مقاله مقدار تolerانس برابر با $0/001$ در نظر گرفته شده است. با حل معادلات دیفرانسیل معمولی غیرخطی (۱۰)، دماهای T_1 تا T_7 بدست می آیند. برای حل این معادلات دیفرانسیل نیاز به دانستن مقدار تمامی پارامترهای سیستم است که در ادامه با استفاده از روش های بهینه سازی شناسایی می شوند.

۴- شناسایی پارامترهای مدل و اعتبارسنجی تجربی

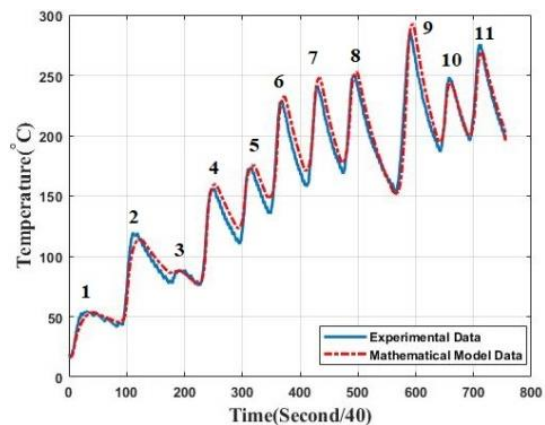
یکی از روش ها برای شناسایی سیستم های غیرخطی، استفاده از داده های تجربی و به کارگیری روش های بهینه سازی جهت تنظیم پارامترهای مدل استخراج شده جهت تطبیق خروجی مدل با نتایج تجربی است [۲۵]. در این روش، ابتدا مدل غیرخطی سیستم به شکل فضای حالت، با استفاده از قوانین فیزیک استخراج می شود. در این مدل پارامترهای مجهولی

با استفاده از روابط (۱) تا (۹)، مدل ریاضی سیستم به صورت زیر می باشد:

$$\begin{aligned} \frac{dT_1}{dt} &= \frac{q_1}{m_1 C_p} - \frac{J_1 - \sigma T_1^4}{R_1 m_1 C_p} \\ &\quad - \frac{T_1 - T_\infty}{m_1 C_p (R_{cond} + R_{tconv})} \\ \frac{dT_2}{dt} &= \frac{q_2}{m_2 C_p} - \frac{J_2 - \sigma T_2^4}{R_2 m_2 C_p} \\ &\quad - \frac{T_2 - T_\infty}{m_2 C_p (R_{cond} + R_{tconv})} \\ \frac{dT_3}{dt} &= \frac{q_3}{m_3 C_p} - \frac{J_3 - \sigma T_3^4}{R_3 m_3 C_p} \\ &\quad - \frac{T_3 - T_\infty}{m_3 C_p (R_{cond} + R_{tconv})} \\ \frac{dT_4}{dt} &= \frac{q_4}{m_4 C_p} - \frac{J_4 - \sigma T_4^4}{R_4 m_4 C_p} \\ &\quad - \frac{T_4 - T_\infty}{m_4 C_p (R_{cond} + R_{tconv})} \\ \frac{dT_5}{dt} &= \frac{J_5 - \sigma T_5^4}{R_5 m_5 C_p} - \frac{T_5 - T_\infty}{m_5 C_p (R_{cond} + R_{tconv})} \\ \frac{dT_6}{dt} &= \frac{J_6 - \sigma T_6^4}{R_6 m_6 C_p} - \frac{T_6 - T_\infty}{m_6 C_p (R_{cond} + R_{tconv})} \\ \frac{dT_7}{dt} &= \frac{J_7 - \sigma T_7^4}{R_7 m_7 C_p} \end{aligned} \quad (10)$$



(الف)



(ب)

شکل ۴- الف) موج PWM اعمالی به هیترها و ب) مقایسه دمای خروجی مدل ریاضی و سیستم تجربی

اعتبار مدل ارائه شده را با محاسبه رابطه ۱۲ ارزیابی خواهیم کرد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (12)$$

که در آن n تعداد نمونه‌ها، y_i مقدار تجربی، f_i مقدار بدست آمده از مدل ریاضی و \bar{y}_i میانگین مقادیر تجربی است.

بر مبنای رابطه ۱۲، برای شکل ۴ داریم: $R^2 = 0.9983$ که نشان دهنده دقت بسیار خوب مدل در تخمین رفتار سیستم است. بخشی از اختلاف بین نتایج تجربی را می‌توان ناشی از وجود فرضیات ساده کننده ارائه شده در ابتدای بخش ۳ دانست. باید توجه داشت که علاوه بر فرضیات ساده کننده، ممکن است خطای بین مدل ریاضی و نتایج تجربی با استفاده از الگوریتم‌های دقیق‌تر بهینه‌سازی و استخراج

وجود دارد که باید به گونه‌ای محاسبه شوند که بهترین تطابق بین نتایج تجربی و خروجی مدل وجود داشته باشد؛ به عبارت دیگر، باید خطای بین خروجی مدل و نتایج تجربی کمینه گردد که منجر به یک مسئله بهینه‌سازی می‌شود. در این مقاله، از الگوریتم ژنتیک برای حل این مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است.

برای شناسایی پارامترهای مدل ریاضی، مطابق شکل ۴- الف، داده یازده چرخه گرم و سرد شدن توسط بورد آردوینو یونو و مازول MAX 31865 و یک ترموکوپل PT100 ثبت شده است که دقت این ترموکوپل یک دهم درجه است و برای تطبیق خروجی مدل ریاضی ارائه شده با نتایج تجربی، پارامتر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (h)، ضریب انتقال حرارت رسانشی (k)، ضریب گسیل (ϵ)، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای صفحه A_6 (h_6) و ضریب انتقال حرارت رسانشی برای صفحه A_6 (k_6) با استفاده از الگوریتم ژنتیک، شناسایی شده‌اند. با توجه به غیرخطی بودن مدل در مد تشعشع، پارامترها به صورت تابعی خطی از دمای اولیه استخراج شده‌اند [۲۴]:

$$\Phi = AT_0 + B \quad (11)$$

که $\Phi = [k \ h_6 \ k_6 \ \epsilon]^T$ بردار پارامترهای مدل ریاضی هستند که به صورت تابعی خطی از شرایط اولیه تعریف شده‌اند. ماتریس‌های ثابت و ستونی $A_{4 \times 1}$ و $B_{4 \times 1}$ دارای ۸ ثابت هستند که باید با حل مسئله بهینه‌سازی استخراج شوند.

همچنین، جهت تطبیق بهتر مدل، پارامترهای سیستم در دو فاز حرارت دهی و خنک شدن به صورت جداگانه استخراج شده‌اند؛ یعنی هشت پارامتر مرتبط با Φ برای فاز حرارت دهی و هشت پارامتر برای فاز خنک شدن. برای اعتبارسنجی شناسایی انجام شده، از هشت سیکل برای شناسایی پارامترهای مدل و سه سیکل (سیکل‌های ۴، ۵ و ۸) برای صحت‌سنجی استفاده شده است. سیکل‌های حرارت دهی و خنک شدن به صورت بازه‌های تصادفی در طی حدود ۸ ساعت انتخاب شده‌اند. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، ورودی اعمال شده به سیستم به گونه‌ای است که دامنه حرارتی مورد نظر در سیستم (از دمای محیط تا حدود ۳۰۰ درجه) را شامل می‌شود.

کروموزوم برای قرار گرفتن در استخر ترکیب، متناسب با برزندگی آن رشته یا کروموزوم محاسبه می‌شود؛ بنابراین، احتمال قرار گرفتن رشته F_i در استخر ترکیب، متناسب با برزندگی آن خواهد بود. از آنجایی که در الگوریتم ژنتیک اندازه جمعیت ثابت است، حاصل جمع تمامی احتمالات محاسبه شده برای انتخاب و قرار گرفتن کروموزومها یا رشتهها در استخر ترکیب، برابر با ۱ خواهد بود؛ بنابراین، احتمال انتخاب و قرار گرفتن رشته F_i در استخر ترکیب، برابر است با:

$$p_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (15)$$

در این رابطه، n برابر با اندازه جمعیت است. یک روش ساده برای پیاده‌سازی این عملگر، تصور کردن یک چرخ رولت است که محیط آن، متناسب با برزندگی هر یک از رشتهها یا کروموزومها نشانگذاری شده است. چرخ رولت، n بار خواهد چرخید. در هر بار چرخش این چرخ، هر نمونه‌ای که توسط نشانگر چرخ نشان داده شود، برای قرار گرفتن در استخر ترکیب انتخاب می‌شود.

از آنجایی که محیط چرخ رولت، متناسب با برزندگی هر یک از رشتهها یا کروموزومها نشانگذاری شده است، انتظار می‌رود که F_i/\bar{F} کپی از رشته F_i توسط این عملگر، در استخر ترکیب تولید شود. برزندگی میانگین جمعیت کروموزومها نیز به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$\bar{F} = \sum_{i=1}^n F_i \quad (16)$$

چنانچه بعد از چند نسل، کروموزومهای تولید شده به مقدار بهتری برای تابع هزینه پیدا نکنند، یک جهش ژنتیکی در نسل بعد ایجاد می‌شود و فرزندان جدید، فضای بیشتری از مسئله را پوشش می‌دهند. در هر نسل، فرزندان تولید شده ارزیابی می‌شوند و سرانجام یک جمعیت جدید براساس بهترین فرزندان تولید شده تشکیل می‌شود. مراحل مختلف الگوریتم ژنتیک در شکل ۵ نشان داده شده است.

برنامه الگوریتم ژنتیک به گونه‌ای طراحی شده که چنانچه مقدار تابع هدف بعد از تعداد زیادی نسل تغییر نکند، الگوریتم متوقف می‌شود؛ همچنین می‌توان بعد از اجرای الگوریتم تغییرات دمای T_7 را مشاهده کرد و چنانچه با داده‌های تجربی مطابقت داشته باشد، الگوریتم همگرا شده است.

دقیق‌تر پارامترهای سیستم کاهش یابد. البته اختلاف موجود ناچیز بوده و برای کاربردهای بلادرنگ، به خصوص طراحی کنترل‌کننده‌های مدل‌مبنا بسیار مناسب است. باید توجه داشت که چنین سیستم‌هایی معمولاً در شرایط محیطی متفاوتی مانند دمای محیط کار می‌کنند و ضرایب مدل برای آن شرایط محیطی باید اصلاح شود. البته وظیفه کنترل-کننده‌های مقاوم مانند کنترل‌کننده ارائه شده در [۱۷] غلبه بر چنین نامعینی‌های است؛ بنابراین چنین اختلافی بین مدل ریاضی و نتایج تجربی قابل قبول است.

۴-۱- الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک

الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری می‌باشد که از نظریه تکاملی داروین الهام گرفته شده است. بر این اساس، گونه‌هایی که در طبیعت بهترین ویژگی‌ها را دارند، به تولید مثل و بقا ادامه می‌دهند و آن گونه‌هایی که این خصوصیات را نداشته باشند به تدریج و در طول زمان از بین می‌روند. در ابتدا همانند هر الگوریتم فراابتکاری، یک جمعیت اولیه از جواب‌های ممکن برای مسئله مورد نظر تولید می‌شود. هر کدام از این جواب‌ها ژن نامیده می‌شود. برای یک مسئله n بعدی می‌توان رابطه (۱۳) را نوشت.

$$gene = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (13)$$

برای کروموزوم‌های ایجاد شده می‌توان رابطه (۱۴) را نوشت.

$$chromosome = \begin{bmatrix} gene_1 \\ gene_2 \\ \vdots \\ gene_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

ابتدا هر یک از کروموزومها ارزیابی شده و سپس با ترکیب کروموزومها، فرزندان تولید می‌شوند. عملگر تولید مثل کروموزوم‌های خوب جمعیت را انتخاب می‌کند و آن‌ها را در مخزنی که در اصطلاح به آن استخر ترکیب^۱ گفته می‌شود، قرار می‌دهد. یکی از عملگرهای شایع و پرکاربرد برای تولید مثل در الگوریتم ژنتیک، روش انتخاب چرخ رولت^۲ نام دارد. در این عملگر، احتمال انتخاب یک رشته یا

^۱ Mating Pool

^۲ Roulette-Wheel Selection

پارامترهای سیستم را در فاز خنک شدن بر مبنای رابطه (۱۱) نشان می‌دهند.

$$h = 0/0399T_0 + 12/032 \quad (17)$$

$$k = 0/0006T_0 + 0/0742 \quad (18)$$

$$h_6 = 0/1501T_0 - 3/344 \quad (19)$$

$$k_6 = 0/0036T_0 - 0/0313 \quad (20)$$

$$\varepsilon = 0/0005T_0 + 0/12 \quad (21)$$

در روابط فوق، T_0 دمای اولیه محفظه در هر چرخه است. با توجه به شکل ۴-ب، دمای اولیه در سیکل گرم شدن نقاط دره و دمای اولیه برای سیکل سرد شدن نقاط قله نمودار است.

$$h = 0/0055T_0 + 23/359 \quad (22)$$

$$k = 0/0013T_0 + 0/6628 \quad (23)$$

$$h_6 = 0/0045T_0 + 23/388 \quad (24)$$

$$k_6 = 0/001T_0 + 0/6997 \quad (25)$$

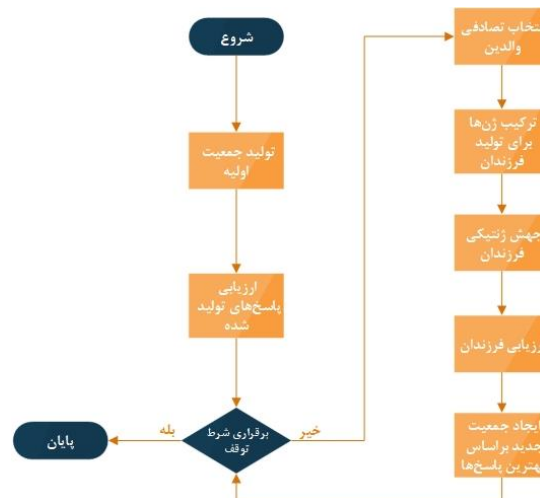
$$\varepsilon = -0/0003T_0 + 0/2204 \quad (26)$$

شکل ۴-ب تطابق مناسب نتایج تجربی و مدل ریاضی را نشان می‌دهد. برای این منظور ورودی یکسانی به سیستم تجربی و مدل ریاضی اعمال شده است (شکل ۴-الف). پاسخ سیستم تجربی توسط بورد الکترونیکی ضبط و پاسخ مدل ریاضی از حل معادلات دیفرانسیل معمولی غیرخطی (۱۰) بدست آمده است.

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، با اعمال حرارت به سیستم، دما در تمامی سیکل‌ها با روند مشابهی بالا می‌رود و زمانیکه حرارت دهی قطع می‌شود، دما به شکل نمایی افت می‌کند که با روند فیزیکی کاهش دما در سیستم‌های انتقال حرارت مطابقت دارد [۲۴].

۵- شناسایی تابع تبدیل

برای بررسی بیشتر دینامیک سیستم مورد نظر، تابع تبدیل سیستم برای سه نقطه کاری محاسبه شده است. با اعمال ورودی پله به سیستم تجربی و ثبت داده‌های دما (خروجی) توسط سنسور PT100 و با استفاده از جعبه ابزار شناسایی سیستم نرم افزار متلب، سه تابع تبدیل برای کوره برای سه نقطه کاری متفاوت به دست آمده است. همانطور که مشاهده



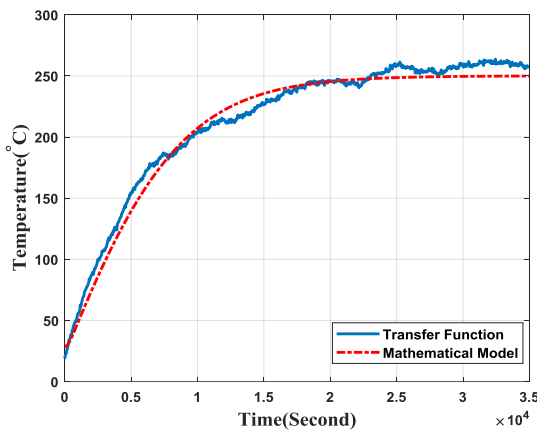
شکل ۵- فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک

با توجه به اینکه الگوریتم‌های فرا ابتکاری، جواب اولیه‌ای را تولید و پس از ارزیابی، جواب دیگری را ایجاد می‌کنند، مسئله همراه دارای جواب است؛ هرچند ممکن است، جواب بهینه کلی نباشد. برای رسیدن به جواب بهینه در چنین الگوریتم‌هایی و قرار نگرفتن در کمینه‌های محلی، تدابیری مانند جهش در الگوریتم ژنتیک دیده شده است. البته در این مسئله خاص در این مقاله، با توجه به داشتن اطلاعات تجربی می‌توان پاسخ سیستم و عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی را ارزیابی نمود.

نتایج به دست آمده برای پارامترهای مورد نظر توسط الگوریتم ژنتیک (جدول ۱) نشان می‌دهد که هر چه دمای کوره بالاتر می‌رود پارامترهای h ، k ، h_6 و k_6 به طور خطی افزایش می‌یابند و هر چه دمای کوره پایین می‌رود، این پارامترها به طور خطی کاهش می‌یابند. روابط (۱۷) تا (۲۱) پارامترهای سیستم را در فاز گرم شدن و روابط (۲۲) تا (۲۶)

جدول ۱- پارامترهای در نظر گرفته شده در الگوریتم ژنتیک

اندازه جمعیت	۵۰
تعداد نسل	۱۰۰
احتمال crossover	۰/۸
احتمال جهش	۰/۰۲
تعداد جمعیت جدید	۵۰



شکل ۶- مقایسه رفتار مدل تجربی (تابع تبدیل) و مدل ریاضی غیر خطی توسعه داده شده

نمونه برداری، برای هر متغیر یک تابع چگالی احتمال^۵ در نظر گرفته می شود و توزیع نمونه ها به N بازه مساوی تقسیم می شود. N باید از $k+1$ بزرگتر باشد که k تعداد پارامترهای متغیر است. هر یک از این N بازه در هر مرتبه یکبار نمونه برداری می شوند. با این روش، نه تنها تعداد نمونه ها در مقایسه با نمونه برداری ساده کمتر نمی شود بلکه کل بازه را نیز بهتر پوشش می دهد. سپس، یک ماتریس که ماتریس LHS نامیده می شود تشکیل می شود که دارای N ردیف و k ستون است. برای هر ردیف، خروجی مدل استخراج شده و سپس اثر تغییر پارامتر سنجیده خواهد شد [۲۶ و ۲۷]. برای هر پارامتر عددی در بازه [۱-] اختصاص داده می شود که بزرگی عدد نشان دهنده اثر بیشتر بر خروجی و علامت آن نوع رابطه را نشان می دهد. در این مقاله، آنالیز حساسیت با در نظر گرفتن پنج پارامتر ضریب انتقال حرارت جابه جایی (h)، ضریب انتقال حرارت رسانشی (k)، ضریب گسیل (ϵ)، ضریب انتقال حرارت جابه جایی برای صفحه A_6 (h_6) و ضریب انتقال حرارت رسانشی برای صفحه A_6 (k_6) و خروجی دمای نقطه T_7 محاسبه شده است (شکل ۷). همانطور که شکل ۷ نشان داده شده است، k بیشترین تأثیر مثبت و ϵ بیشترین تأثیر منفی را دارد؛ همچنین، کمترین اثر مربوط به h_6 است.

می شود، این سه تابع تبدیل دارای قطب های متفاوتی هستند که نشان دهنده غیر خطی بودن سیستم است.

$$G_1(z) = \frac{0/01439z}{z^2 - 1/768z + 0/7696} \quad (27)$$

$$G_2(z) = \frac{0/000437z}{z^2 - 1/983z + 0/9826} \quad (28)$$

$$G_3(z) = \frac{0/02012z}{z^2 - 1/583z + 0/5851} \quad (29)$$

رفتار سیستم تجربی (تابع تبدیل) و مدل ریاضی توسعه داده شده در شکل ۶ ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می شود، تطابق مناسبی بین مدل تجربی و مدل ریاضی غیر خطی توسعه داده شده وجود دارد.

مقدار R^2 برای نتایج شکل ۶ برابر با ۰/۹۹۸۶ که نشان دهنده دقت مناسب مدل ریاضی سیستم است. البته باید توجه داشت که مدل تابع تبدیل صرفاً حول همان نقطه کاری دارای دقت است و مدل ریاضی ارائه شده در تمام نقاط کاری قابل ارزیابی است. علت اختلاف بین مدل ریاضی فضای حالت و مدل تابع تبدیل در شکل ۶ را می توان ناشی از خطی بودن مدل تابع تبدیل و همچنین فرضیات ساده سازی ارائه شده در ابتدای بخش ۳ دانست.

۶- آنالیز حساسیت

۶-۱- آنالیز حساسیت کلی^۱

به منظور بررسی اثر پارامترهای سیستم بر روی خروجی سیستم دینامیک ارائه شده، از آنالیز حساسیت بهره گرفته شده است. برای این منظور، آنالیز حساسیت کلی^۲ با نمونه برداری لاتین هایپرکیوب^۳ و ضرایب همبستگی رتبه جزئی^۴ برای رتبه بندی پارامترها استفاده شده است که مطمئن ترین و موثرترین روش است [۲۶].

جهت انجام آنالیز حساسیت از نمونه برداری لاتین- هایپرکیوب استفاده شده است که یک نمونه برداری طبقه ای مونت کارلو است. این روش با نمونه برداری مناسب تر، صحت بیشتری نسبت به نمونه برداری های ساده دارد. در این روش

¹ Global Sensitivity Analysis (GSA)

² Global Sensitivity Analysis (GSA)

³ Latin Hypercube Sampling (LHS)

⁴ Partial Rank Correlation Coefficients (PRCC)

⁵ Probability Density Function (PDF)

بر سیستم خواهند داشت. از این رو، آنالیز حساسیت یک ابزار اساسی در تحلیل مدل‌ها است.

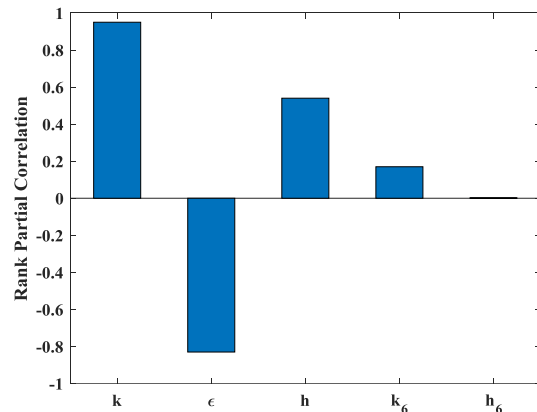
۶-۲- مطالعه اثر پارامترها بر رفتار سیستم

برای بررسی اثر تغییرات پارامترهای سیستم بر روی رفتار سیستم، هر کدام از آن‌ها در بازه 20% تا 20% نسبت به مقدار نامی آن تغییر داده شده و رفتار سیستم (دمای نقطه T_7) ترسیم شده است. به نوعی در این بخش، آنالیز حساسیت محلی^۱ انجام شده است. برای این منظور، همه پارامترهای سیستم در مقدار نامی خود (مقادیر استاندارد در مای محیطی)، ثابت فرض می‌شوند و فقط یکی از پارامترها در چهار مقدار 10% ، 10% ، 20% و 20% مقدار نامی قرار داده می‌شود و رفتار سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. اثر تغییر پارامتر h در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در دماهای پایین‌تر، اثر این پارامتر کمتر بوده و در دماهای بالاتر، اختلاف بیشتری نسبت به رفتار سیستم با مقدار پارامتر نامی ایجاد می‌شود. روند تغییرات نشان می‌دهد که با کاهش این پارامتر، دما افزایش می‌یابد که با شواهد فیزیکی تطابق کامل دارد.

اثر تغییر در پارامتر k در شکل ۹ نشان داده شده است. اثر تغییر در ضریب انتقال حرارت رسانش بسیار شدیدتر از ضریب انتقال حرارت همرفت بوده و مشابه حالت قبل، این اثر در دماهای بالاتر بیشتر است. همانطور که مشاهده می‌شود، با کاهش این پارامتر، دما افزایش پیدا می‌کند که در تطابق کامل با شواهد تجربی دارد.

اثر تغییر در پارامتر ϵ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشابه با ضریب k ، تغییر این پارامتر در تمام دامنه دمایی دارای اثر است و این اثر در دماهای بالاتر بیشتر است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش این ضریب، دمای داخل محفظه افزایش می‌یابد.

روند اثرگذاری سه پارامتر فوق بر روی خروجی سیستم مشابه روندی است که در آنالیز حساسیت کلی به آن رسیدیم. یعنی با افزایش ضریب گسیل، دما افزایش می‌یابد، و با افزایش دو پارامتر ضریب انتقال حرارت هدایتی و همرفتی، دما کاهش می‌یابد.



شکل ۷- ضرایب همبستگی رتبه جزئی برای مدل ریاضی آون خلاء

به عبارت دیگر، چنانچه پارامترهای k, h, k_6 افزایش یابند، باعث کاهش دمای نقطه T_7 داخل آون می‌شوند و برعکس افزایش ضریب ϵ ، منجر به افزایش دمای نقطه T_7 در داخل آون می‌شود. در بین پارامترهای k, h, k_6 ، ضریب k بیشترین تاثیر را در کاهش دمای نقطه T_7 در داخل آون دارد و بعد از آن ضرایب h, k_6 قرار دارند؛ همچنین، میزان اثر پارامتر ϵ در افزایش دمای نقطه T_7 در داخل آون از اثر پارامترهای h, k_6 در کاهش دمای نقطه T_7 داخل آون، بیشتر است.

این آنالیز به خصوص در مرحله طراحی و ساخت هر سیستمی اهمیت بسیار بالایی دارد. در این مسئله به طراح نشان می‌دهد که جهت افزایش سرعت پاسخ سیستم (رسیدن به دمای مورد نظر در نقطه T_7 در کوتاه‌ترین زمان) و کاهش اتلافات حرارتی، عایق سازی اطراف کوره از بیشترین اهمیت برخوردار است؛ همچنین، بیان می‌کند که هر چه سطوح ورقکاری داخل آون براق‌تر باشند، سرعت پاسخ سیستم بیشتر است. کم اثر بودن پارامتر h_6 ، نشان دهنده وابستگی کم دمای نقطه T_7 در داخل آون به ضریب انتقال حرارت همرفت از سطح A_6 است.

در مسایل کنترلی، آنالیز حساسیت یک ابزار مهم در تشخیص پارامترهایی است که اگر مقادیر آن‌ها نامعلوم و یا دارای نامعینی هستند، نیاز به تخمین در حین کنترل سیستم را دارند (کنترل تطبیقی)؛ همچنین، آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که کدام پارامترها بیشترین تاثیر اغتشاشی را

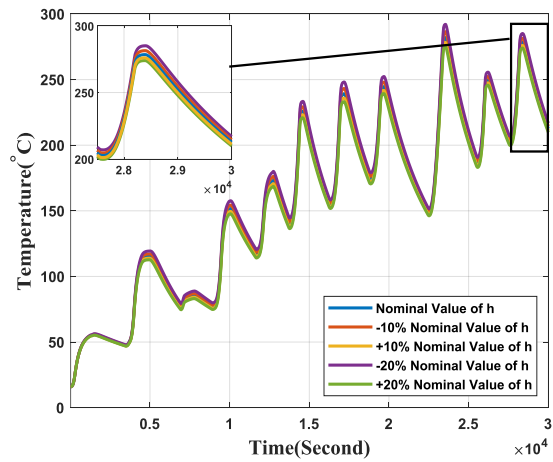
¹ Local Sensitivity Analysis (LSA)

۷- نتیجه گیری

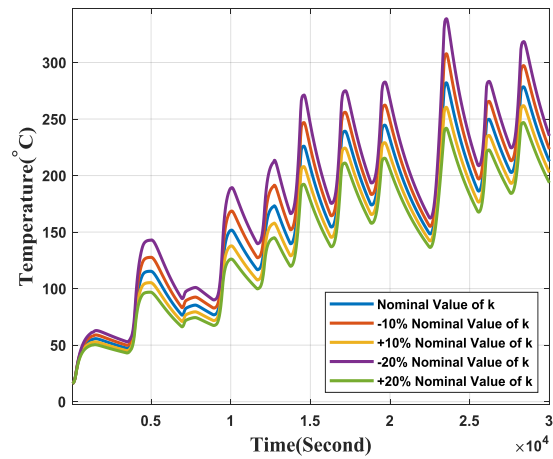
در این مقاله یک مدل ریاضی برای نشان دادن انتقال حرارت در یک محفظه مکعبی خلاء ارائه شده است. این مدل به شکل یک دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی غیرخطی است. این مدل نه تنها می‌تواند برای طراحی ابعادی و بهینه‌سازی حرارتی کوره‌ها استفاده شود، بلکه برای طراحی کنترل‌کننده‌های مدل‌مینا و کاربردهای برخط نیز بسیار مفید است. جهت اعتبارسنجی مدل ارائه شده، از یک سیستم تجربی استفاده شده است. برای استخراج پارامترهای مدل که به صورت تابعی خطی از دمای اولیه سیستم تعریف شده‌اند، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. تطابق نتایج مدل غیرخطی ارائه شده و سیستم تجربی، نشان دهنده اعتبار مدل ارائه شده است. برای شناسایی پارامترهای سیستم به دلیل غیرخطی بودن سیستم از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک استفاده شده است. همچنین، جهت بررسی پارامترهای حساس بر خروجی سیستم، از شبیه‌سازی مونت کارلو برای آنالیز حساسیت کلی استفاده شده است. در این روش، از نمونه برداری لاتین هایپرکیوب و ضرایب همبستگی رتبه جزئی برای رتبه‌بندی پارامترها استفاده شده است. آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که مهم‌ترین پارامتری که موثر در کاهش دما در داخل یک کوره مکعبی است، ضریب انتقال حرارت رسانش بدنه اطراف است؛ و مهم‌ترین پارامتری که موثر در افزایش دما در داخل یک کوره مکعبی است، ضریب گسیل سطوح داخل است. به عبارت دیگر، هرچه سیستم حرارتی دارای عایق‌بندی بهتری باشد و سطوح ورقکاری شده در داخل، براق‌تر باشند، نه تنها انرژی کمتری مصرف می‌شود، بلکه سرعت پاسخ سیستم بیشتر است.

۸- مراجع

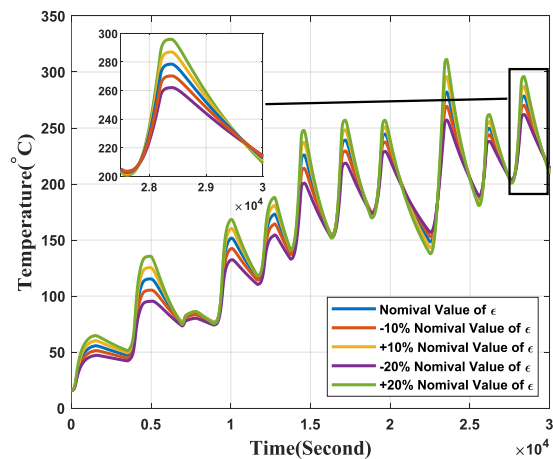
- [1] Tudon-martinez JC, Cantu-perez A, Lozoya-santos JDJ, Cardenas-romero A (2019) Mathematical model-based design of an industrial box furnace. Appl Therm Eng 161(March): 114153.
- [2] Hao X, Gu J, Chen N, Zhang W, Zuo X (2008) 3-D Numerical analysis on heating process of loads within vacuum heat treatment furnace. Appl Therm Eng 28: 1925-1931.
- [3] De Castro JA, Nogami H, Yagi J (2002) Three-dimensional multiphase mathematical modeling of the blast furnace based on the multifluid model. ISIJ Int 42(1): 44-52.



شکل ۸- اثر تغییر پارامتر h بر رفتار سیستم حرارتی



شکل ۹- اثر تغییر پارامتر k بر رفتار سیستم حرارتی



شکل ۱۰- اثر تغییر پارامتر ϵ بر رفتار سیستم حرارتی

- [16] Tan C, Jenkins J, Ward J, Broughton J, Heeley A (2013) Zone modelling of the thermal performances of a large-scale bloom reheating furnace. *Appl Therm Eng* 50(1): 1111-1118.
- [17] Almutairi NB, Zribi M (2015) Sliding mode controllers for a tempered glass furnace. *ISA Trans* 1-17.
- [18] Bitschnau L, Kozek M (2009) Modeling and control of an industrial continuous furnace. *CSSim 2009 - 1st Int Conf Comput Intell Model Simul* 231-236.
- [19] Liu SL, Liu GX, Cheng XF, Zhang WX (2014) Design of temperature control system based on PLC. *Appl Mech Mater* 644-650(MEEES): 195-198.
- [20] Pringsakul N, Puangdownreong D (2019) Obtaining optimal PID controller for temperature control of electric furnace system via flower pollination algorithm department of electrical engineering. *WSEAS Trans Syst Control* 14: 1-7.
- [21] Sinlapakun V, Assawinchaichote W (2015) Optimized PID controller design for electric furnace temperature systems with Nelder Mead Algorithm. *ECTI-CON 2015 - 2015 12th Int Conf Electr Eng Comput Telecommun Inf Technol*.
- [22] Wang Y, Li H, Yang B (2020) Modeling of furnace operation with a new adaptive data echo state network method integrating block recursive partial least squares. *Appl Therm Eng* 171.
- [23] Blažič A, Škrjanc I, Logar V (2021) Soft sensor of bath temperature in an electric arc furnace based on a data-driven Takagi–Sugeno fuzzy model. *Appl Soft Comput* 113: 107949.
- [24] INCORPERA (2012) Heat and Mass transfer. vol. 66.
- [25] Simpkins C (2012) System Identification: Theory for the User. 2nd edn. (Ljung, L.; 1999) [On the Shelf], vol. 19.
- [26] Hoare A, Regan DG, Wilson DP (2008) Sampling and sensitivity analyses tools (SaSAT) for computational modelling. *Theor Biol Med Model* 5: 1-18.
- [27] Iooss B, Lemaître P (2015) Uncertainty management in simulation-optimization of complex systems. *Oper Res Comput Sci Interfaces Ser* 59: 101-122.
- [4] Mayr B, Prieler R, Demuth M, Hochenauer C (2018) Modelling of high temperature furnaces under air-fuel and oxygen enriched conditions. *Appl Therm Eng* 136(March): 492-503.
- [5] Tang G, Wu B, Bai D, Wang Y, Bodnar R, Zhou CQ (2017) Modeling of the slab heating process in a walking beam reheating furnace for process optimization. *Int J Heat Mass Transf* 113: 1142-1151.
- [6] Fiveland WA (1988) Three-dimensional radiative heat-transfer solutions by the discrete-ordinates method. *J Thermophys Heat Trans* 2(4).
- [7] Li ZZ, et al. (2007) Feasible Optimal design of high temperature vacuum furnace using experiences and thermal analysis database. *J Therm Sci Technol* 2(1): 123-133.
- [8] Jiao L, Kuang S, Yu A, Li Y, Mao X, Xu H (2020) Three-Dimensional modeling of an ironmaking blast furnace with a layered cohesive zone. *Metall Mater Trans B Process Metall Mater Process Sci* 51(1): 258-275.
- [9] Prokof'Ev V (2020) Three-dimensional mathematical model of chemical furnace. *Proc - 2020 7th Int. Congr Energy Fluxes Radiat Eff EFRE 2020* 1: 1063-1066.
- [10] Karalis K, Karalis N, N. Karkalos, Ntallis, Antipas GSE, Xenidis A (2021) Three-dimensional computational fluid dynamics analysis of an electric submerged arc furnace. *Sci Rep* 11(1).
- [11] Tutar M, et al. (2021) Optimized CFD modelling and validation of radiation section of an industrial top-fired steam methane reforming furnace. *Comput Chem Eng* 155.
- [12] Richard P, Hiroshi A (1997) Model of four phase motion and heat transfer the blast furnace. *ISIJ Int* 37: 458-467.
- [13] Takeda K, Lockwood FC (1997) Integrated mathematical model of pulverised coal combustion in a blast furnace. *ISIJ Int* 37(5): 432-440.
- [14] Jang JY, Huang JB (2015) Optimization of a slab heating pattern for minimum energy consumption in a walking-beam type reheating furnace. *Appl Therm Eng* 85: 313-321.
- [15] Skopec P, Vyhliđal T, Knobloch J (2019) Reheating Furnace modeling and temperature estimation based on model order reduction. *2019 22nd Int Conf Process Control* 55-61.